

**ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
КАФЕДРА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ**

**ГРЕБЧЕНКО Н.В.**

**МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ  
ВРЕМЕННО ОТКЛЮЧЕННЫХ  
ПРИСОЕДИНЕНИЙ КАБЕЛЬ-ДВИГАТЕЛЬ**

**ДОНЕЦК 2005**

УДК 621.316.925:621.211

Методика оценки состояния изоляции временно отключенных присоединений кабель-двигатель / Н.В. Гребченко .- Донецк, 2005.- 16 с.

Рассмотрен практический способ оценки качества изоляции временно отключенных присоединений кабель-двигатель, основанный на анализе переходных процессов и осциллограмм междуфазных напряжений, возникающих при разряде емкостей присоединения.

Для эксплуатационного персонала, обслуживающего узлы электрических систем с двигателями, а также для студентов и аспирантов соответствующих специальностей.

## Область применения

Метод предназначен для оценки состояния изоляции трехфазных электрических присоединений кабель-двигатель с номинальным напряжением  $U_H = 0,4-10$  кВ и позволяет выявлять снижение комплексного сопротивления изоляции фаз вплоть до замыкания на землю [1-3].

Метод применяется на отключенных присоединениях, непосредственно перед их включением под рабочее напряжение или в случае возникновения необходимости оценки состояния изоляции элементов присоединения (кабеля, двигателя, трансформатора 6-10/0,4).

Метод может применяться самостоятельно или в комплексе с проверкой состояния изоляции с помощью мегаомметра. Метод целесообразно применять после измерения сопротивления с помощью мегаомметра. В последнем случае использование метода позволяет подтвердить вывод о наличии или отсутствии дефектов изоляции, а также выявить дефекты изоляции, которые возникли в результате применения мегаомметра.

Наличие меньших запасов по использованию материалов в электродвигателях (ЭД), а также более тяжелые условия работы изоляции в ЭД, приводит к более частому повреждению обмоток ЭД по сравнению с питающим кабелем. Кроме того, как правило, стоимость ЭД значительно больше стоимости питающего кабеля, поэтому наиболее важной задачей является выявление дефектов изоляции в ЭД.

Эффективность метода наиболее высока в тех случаях, когда выявляется и устраняется дефект изоляции, развитие которого после подачи рабочего напряжения на присоединение приводит к возникновению повреждения и значительным разрушениям.

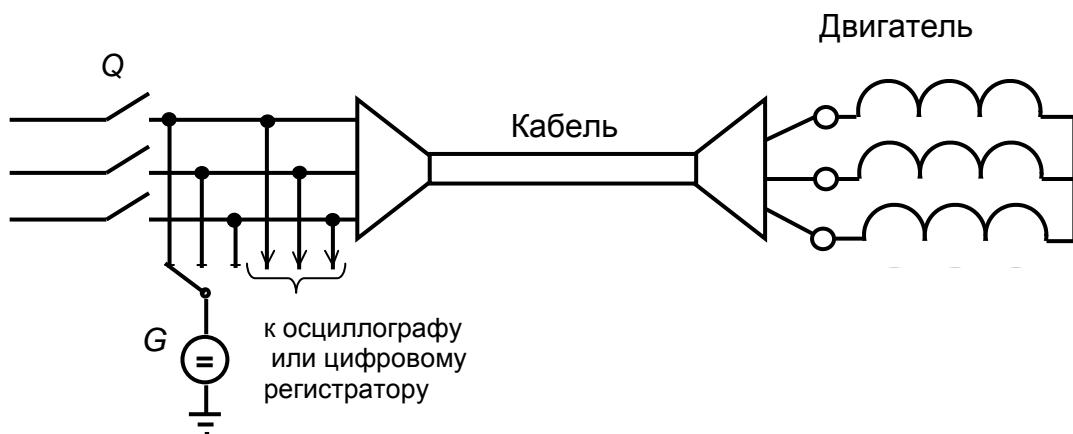
## **Теоретические основы метода выявления дефектов изоляции временно отключенных присоединений**

Вследствие возникновения дефектов изоляции кабелей и обмоток электродвигателей (увлажнение, старение, загрязнение и т.д.) происходит изменение комплексной проводимости изоляции, т.е. не только изменяется активная проводимость, но и реактивная. Изменение реактивной проводимости, т.е. изменение емкости фаз относительно земли, обычно происходит при возникновении дефектов изоляции в кабелях. Емкость изменяется из-за изменения диэлектрической проводимости изоляции

(высыхание, увлажнение и др.) или вследствие шунтирования части емкости местом дефекта.

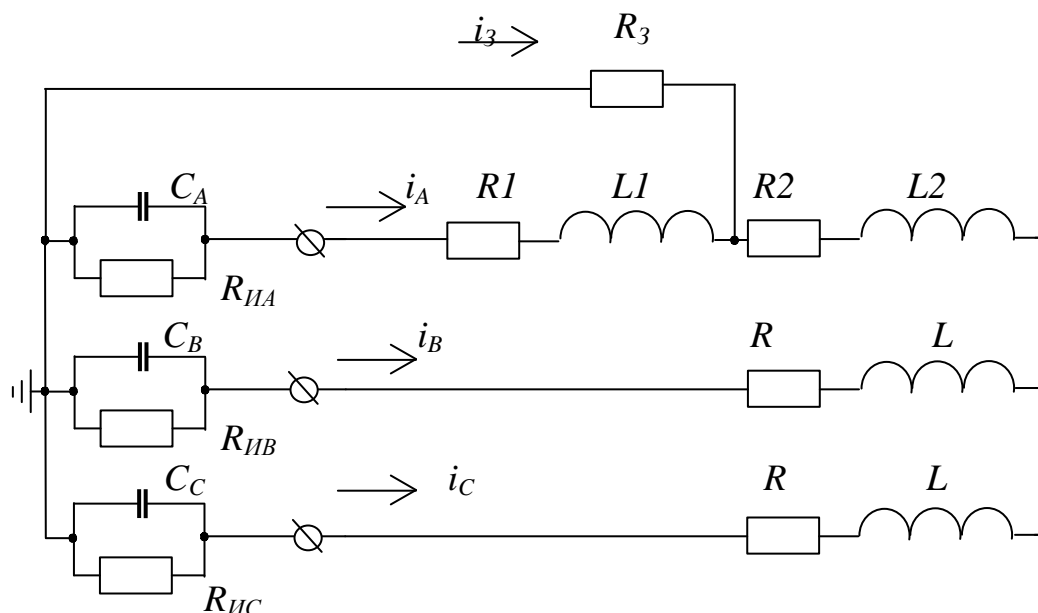
Комплексные проводимости изоляции фаз присоединения по отношению к земле (поперечные проводимости) совместно с продольными проводимостями двигателя (трансформатора) образуют колебательный контур. При подаче постоянного напряжения на одну из фаз отключенного присоединения (рис.1) происходит заряд емкостей по отношению к земле всех трех фаз до величины напряжения источника постоянного тока  $U_{ИПТ}$  (рис.2). Если имеется металлическое замыкание на землю на выводах электродвигателя, то емкость одной из фаз заряжаться не будет. После отключения источника постоянного тока начинается процесс саморазряда емкостей фаз (рис.3-4). При наличии дефекта изоляции в одной из фаз разряд емкостей фаз происходит с различными постоянными времени, что приводит к возникновению колебательного процесса и появлению переменного напряжения (рис.4). При одинаковых поперечных проводимостях фаз присоединения, т.е. при нормальной изоляции или при незначительном дефекте изоляции, переменное напряжение практически не возникает (рис.3).

Установлено, что наличие замыкания на землю в кабеле или в обмотке ЭД в зависимости от его удаленности приводит к изменению параметров колебательного контура, а, следовательно, - к изменению частоты междуфазного напряжения. Влияние дефектов изоляции, при которых сопротивление дефекта более нескольких килоом, практически не оказывает влияния на частоту  $U_{M\phi}$ . Возникновение таких дефектов достаточно надежно обнаруживается по наличию междуфазного напряжения  $U_{M\phi}$  и его амплитуде.



**Рис.1. Электрическая схема для проведения измерений при диагностике присоединения кабель-двигатель**

Таким образом, возникновение переменного напряжения в процессе саморазряда емкостей свидетельствует о наличии дефекта изоляции в одной из фаз присоединения. Частота напряжения, а также соотношение между током саморазряда и междуфазным напряжением зависят от степени и места дефекта изоляции и используются для автоматического определения величины сопротивления дефекта изоляции и места возникновения этого дефекта [3].



**Рис.2. Схема замещения присоединения кабель-двигатель при наличии локального дефекта изоляции фазы А в обмотке статора электродвигателя**

В табл.1 указаны междуфазные напряжения, в зависимости от того, в какой фазе возник дефект изоляции.

Таблица 1

Междуфазные напряжения при саморазряде емкостей присоединения

Междуфазное напряжение	Фаза присоединения с дефектом изоляции		
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
$U_{AB}$	+	+	-
$U_{BC}$	-	+	+
$U_{CA}$	+	-	+

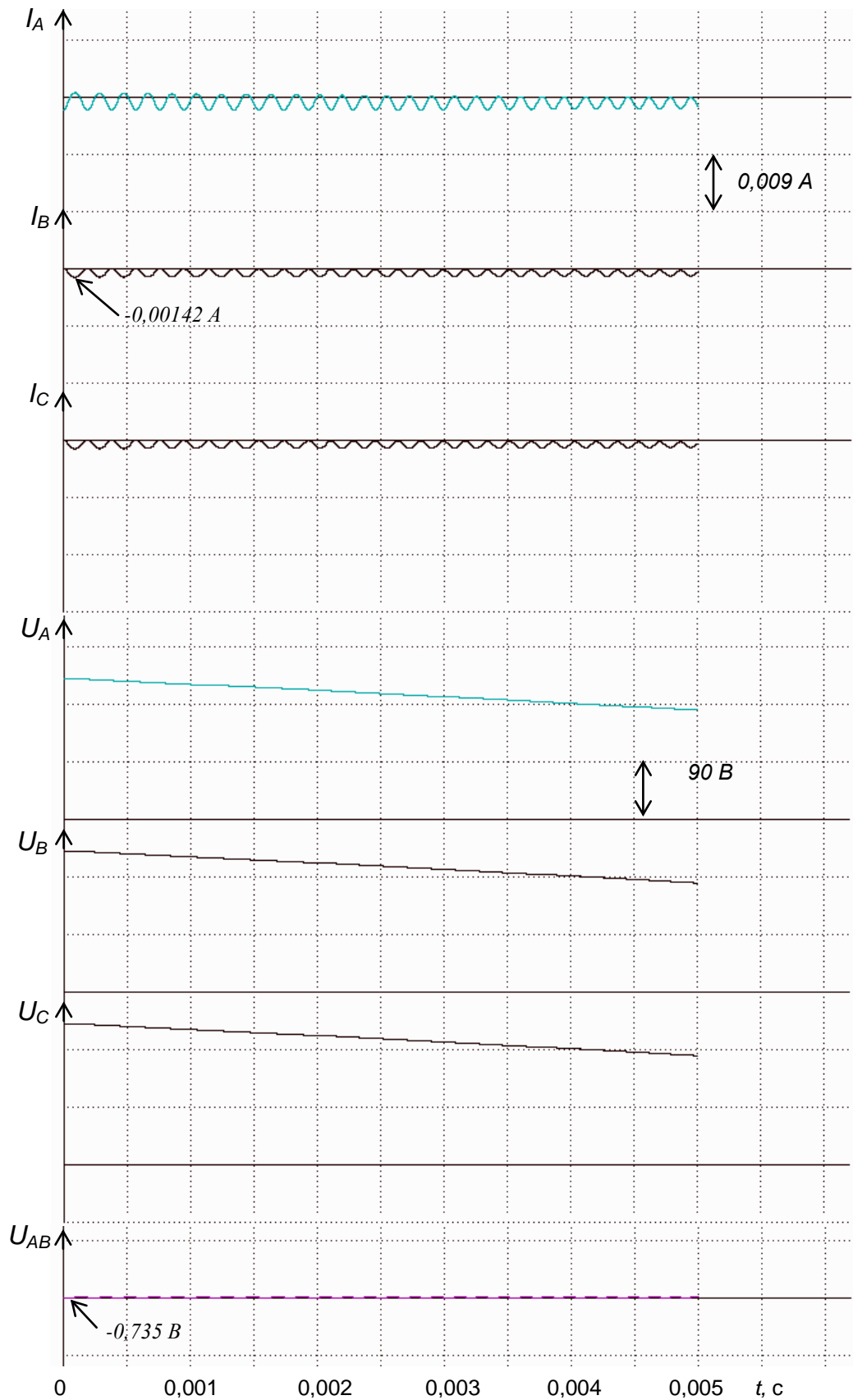


Рис. 3. Осциллограмма токов разряда емкостей фаз, напряжений фаз относительно земли и междуфазного напряжения при разряде емкостей отключенного присоединения двигателя 800 кВт ( $L=0,01$  Гн) с питающим кабелем 0,25 км сечением  $95\text{ мм}^2$  ( $C=0,1$  мкФ) при наличии дефекта изоляции в фазе А (сопротивление  $100000\text{ Ом}$ ) на выводах двигателя

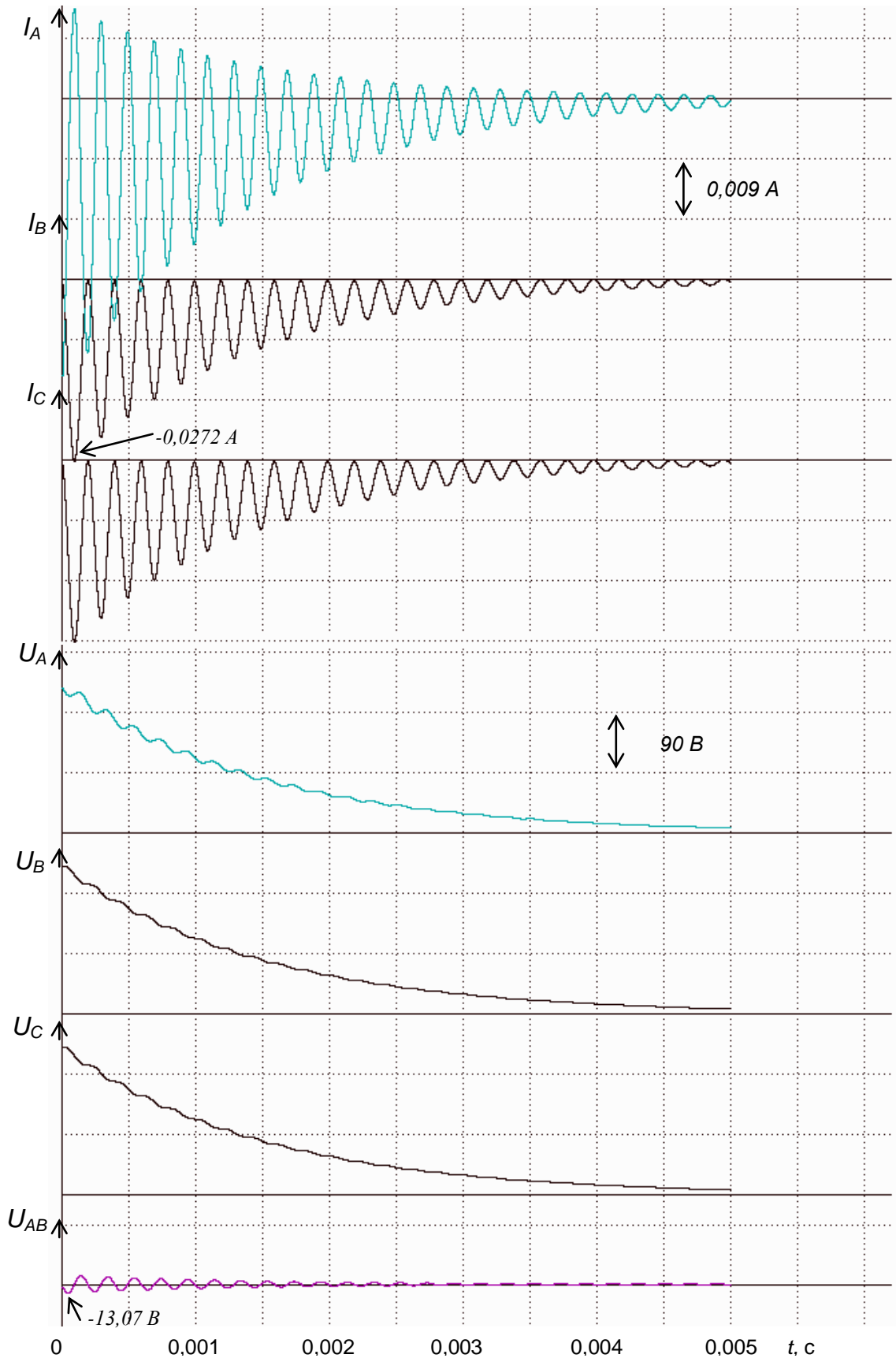


Рис. 4. Осциллограмма токов разряда емкостей фаз, напряжений фаз относительно земли и междуфазного напряжения при разряде емкостей отключенного присоединения двигателя 800 кВт ( $L=0,01$  Гн) с питающим кабелем 0,25 км сечением  $95 \text{ мм}^2$  ( $C=0,1$  мкФ) при наличии дефекта изоляции в фазе А (сопротивление  $5000 \text{ Ом}$ ) на выводах двигателя

## Оценка степени локального дефекта изоляции и определение места возникновения дефекта путем анализа осциллограммы междофазного напряжения $U_{M\Phi}$

На рис. 5 приведены характерные осциллограммы  $U_{M\Phi}$  при наличии замыкания на землю (рис.5, а, б ) и при наличии дефекта изоляции (рис.5, в, г).

Если из осциллограммы установлено, что амплитуда  $U_{M\Phi}$  равна величине напряжения заряда  $U_{ИПТ}$ , то это свидетельствует о наличии замыкания на землю в одной из фаз присоединения. Этот вывод следует из рис.2 при  $R_3 = 0$ . Схема замещения разделяется на две независимые части. Заряд емкости фазы А не оказывает влияния на междофазное напряжение  $U_{M\Phi}$ .

Если удаленность дефекта изоляции обмотки двигателя (замыкания на землю) от ее начала обозначить через  $b$ , то исходя из того, что  $R1 + R2 = R$  и  $L1 + L2 = L$ , можно записать:  $R1 = b \cdot R$ ,  $L1 = b \cdot L$ ,  $R2 = (1 - b) \cdot R$ ,  $L2 = (1 - b) \cdot L$ . Тогда из рис.2 при замыкании на землю ( $R_3 = 0$ ) без учета снижения напряжения в процессе разряда емкостей получим амплитуду междофазного напряжения при разряде:

$$U_{M\Phi} = \frac{4U_{ИПТ} \left[ \omega L(1 - b) + R(1 - b) + \frac{\omega L + R}{2} \right]}{\omega [L + 2L(1 - b)] + [R + 2R(1 - b)]}$$

При изменении  $b$  от нуля до единицы междофазное напряжение не изменяется и  $U_{M\Phi} = 2U_{ИПТ}$ , т.е. амплитуда междофазного напряжения не зависит от удаленности замыкания на землю.



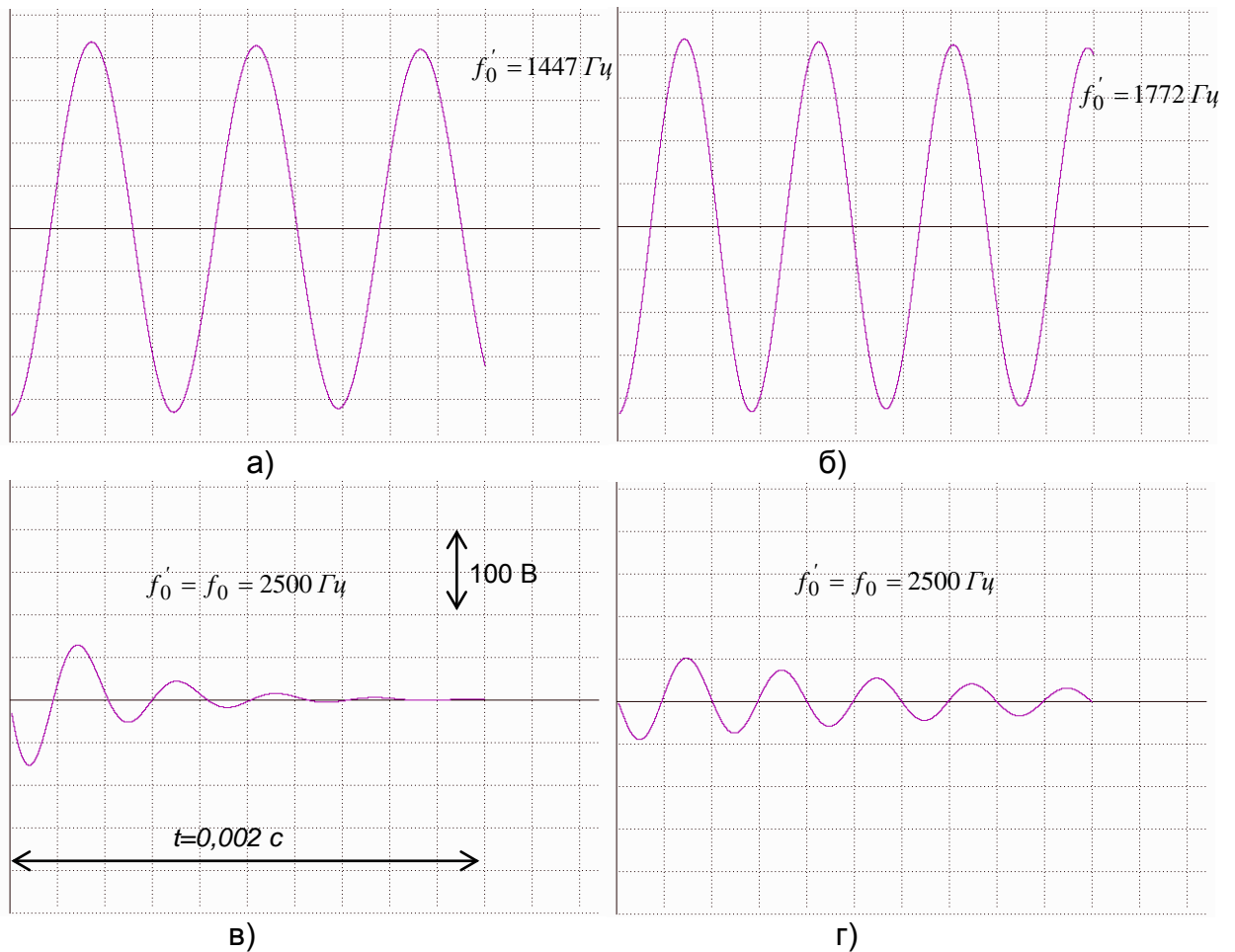


Рис.5. Расчетные осциллограммы междуфазного напряжения присоединения двигателя ДАЗО4-450У-10У1 (мощностью 315 кВт, питающегося по кабелю сечением 95 мм<sup>2</sup> длиной 0,3 км) в процессе разряда емкостей присоединения при наличии дефектов изоляции: а – замыкание на выводах двигателя; б – замыкание в середине обмотки фазы двигателя; в – дефект изоляции с сопротивлением 1000 Ом на выводах двигателя; г - дефект изоляции с сопротивлением 1000 Ом в середине обмотки фазы двигателя. Заряд емкостей производился от источника постоянного тока напряжением 220 В.

Величина  $U_{M\Phi}$ , которая возникает при наличии дефекта изоляции, не зависит от величины напряжения заряда  $U_{ИПТ}$  и для каждого значения  $\frac{C}{L}$  зависит только от величины дефекта  $R_{ДЕФ}$  и его удаленности. На рис.6 приведены некоторые расчетные зависимости  $U_{M\Phi} = f\left(\frac{C}{L}\right)$  для различных значений  $R_{ДЕФ}$  и удаленности дефекта  $b$ . При необходимости определения  $U_{M\Phi}$  для других значений  $C$ ,  $L$ ,  $R_{ДЕФ}$  и  $b$  используется формула:

$$U_{M\Phi} = \frac{UL}{R\sqrt{LC}}(1-b) \quad (1)$$

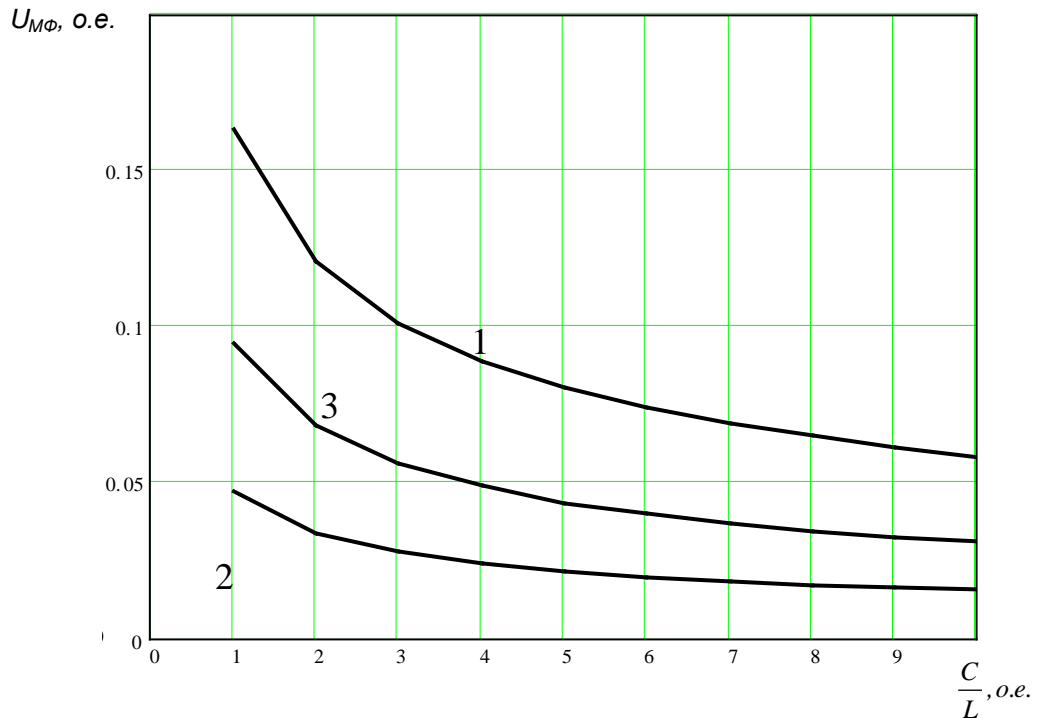


Рис. 6. Зависимость междуфазного напряжения  $U_{M\Phi}$  при разряде емкостей присоединения в зависимости от соотношения параметров присоединения  $\frac{C}{L}$  при дефекте изоляции на выводах электродвигателя: 1- при сопротивлении дефекта изоляции  $R_{ДЕФ} = 5000$  Ом; 2- при сопротивлении дефекта изоляции  $R_{ДЕФ} = 20000$  Ом; 3- при сопротивлении дефекта изоляции  $R_{ДЕФ} = 5000$  Ом в середине обмотки двигателя ( $b=0,5$ ).

Каждое присоединение при исправной изоляции его элементов имеет определенное значение резонансной частоты:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

где  $L$  – индуктивность присоединения, в качестве которого принимается индуктивность фазы обмотки статора ЭД (без учета индуктивности кабеля);

$C$  – емкость фазы присоединения, в качестве которой принимается емкость фазы кабеля (при  $C_{каб} \gg C_{двиг}$  емкость обмотки ЭД не учитывается).

В результате исследований установлено, что при наличии дефекта изоляции более нескольких килоом или при металлическом замыкании на землю в нулевых выводах ЭД частота междуфазного напряжения в процессе разряда:

$$f_{M\Phi} = f_0.$$

При замыкании на землю в обмотке статора ЭД частота  $f_{M\Phi}$  зависит только от удаленности точки замыкания  $b$  (рис.7).

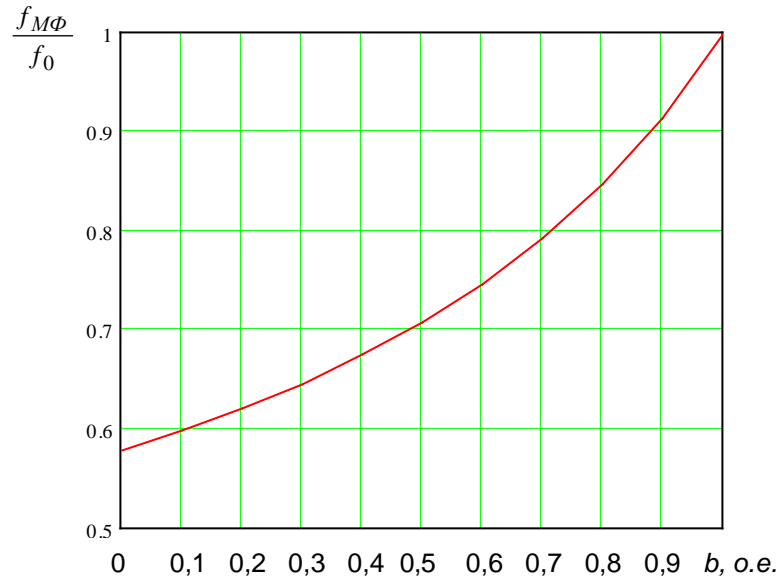


Рис.7. Изменение частоты междуфазного напряжения в зависимости от удаленности замыкания на землю в обмотке статора электродвигателя

### Порядок проведения диагностирования отключенного присоединения

1. Отключить высоковольтный выключатель присоединения.
2. Проверить отсутствие напряжения на присоединении.
3. При наличии заземления в ячейке выключателя отсоединить его от фаз кабеля.
4. Подключить к двум любым фазам (например А и В) вход осциллографа (цифрового регистратора). Выбрать масштаб входного делителя осциллографа (регистратора) исходя из того, что амплитуда входного напряжения может достигать двукратной величины напряжения источника постоянного напряжения. Выполнить настройку осциллографа (регистратора) таким образом, чтобы он фиксировал междуфазное напряжение при разряде емкостей присоединения.
5. Подключить к фазе А в ячейке выключателя вывод «+» от источника постоянного тока. Вывод «-» источника постоянного тока соединить с контуром зазем-

ления. При отсутствии в ИПТ защиты от к.з. необходимо включать резистор, ограничивающий ток в цепи при наличии на испытуемом присоединении замыкания на землю.

6. Путем кратковременного замыкания цепи источника постоянного тока выполняется заряд емкости присоединения. Время замкнутого состояния цепи должно быть не менее  $3\tau = 3 \cdot R_{ист} \cdot C_{прис}$  ( $R_{ист}$  - внутреннее сопротивление источника постоянного тока;  $C_{прис}$  - суммарная емкость кабеля и фазы обмотки статора двигателя). При наличии дефекта изоляции одной из фаз после отключения источника постоянного тока осциллограф (регистратор) должен зафиксировать переменное напряжение, затухающее по амплитуде.

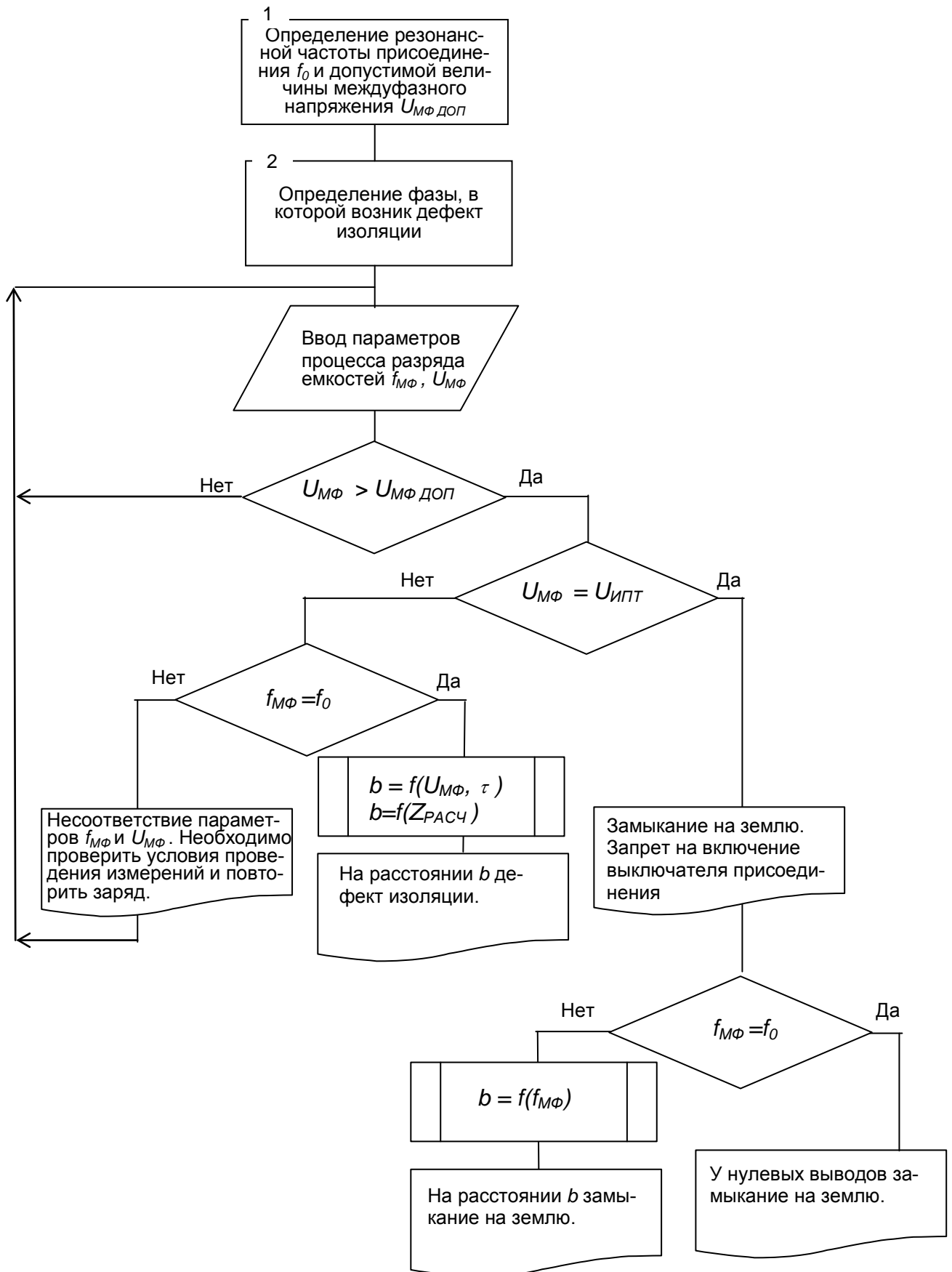
Если после отключения источника постоянного тока осциллограф (регистратор) не зафиксировал переменного напряжения  $U_{AB}$ , то это свидетельствует о том, что в фазах А и В отсутствует дефект изоляции, т.к. проводимости изоляции фаз А и В одинаковы.

Для проверки наличия дефекта изоляции фазы С необходимо вывод ИПТ подключить к другой фазе и повторить действия по пункту 6.

7. Анализ полученной осциллограммы напряжения в процесса разряда емкостей позволяет определить наличие дефекта, степень дефекта и его место.

Для соответствующей интерпретации результатов требуется определение критического значения междуфазного напряжения, которое определяется по формуле (1) при  $b=0$  и допустимом значении сопротивления дефекта изоляции  $R_{деф}$  (например 10-20 кОм).

Алгоритм анализа процесса разряда емкостей и интерпретации результатов исследования присоединения



## Список литературы

1. Гребченко Н.В. Оценка состояния электрической изоляции по параметрам электрических переходных процессов в ней // Сборник научных трудов ДонГТУ. Серия: электротехника и энергетика. Выпуск 4: Донецк, ДонГТУ, 1999. – С.245-248.
2. Гребченко М.В., Фоменко О.О. Автоматизоване діагностування електричних приєднань 6-10 кВ // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля № 4, 2002, с. 152-158.
3. Гребченко Н.В. Автоматизация процесса выявления дефектов временно отключенных присоединений электродвигателей 6-10 кВ потребителей промышленных объектов // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація, випуск 90: Донецьк: ДонНТУ. - 2005. – С. 6-14.

Рабочая емкость  $C_p$ , мкФ/км, трехжильных кабелей с поясной изоляцией  
в трехфазных цепях с симметричным напряжением

(Электротехнический справочник: В 4 т. Т.2. Электротехнические изделия и устройства / Под общ. ред. профессоров МЭИ В.Г. Герасимова и др. – М.: Издательство МЭИ.- 1998.- 518 с.)

Напря- жение, кВ	Сечение жилы, мм <sup>2</sup>										
	10	16	25	35	50	70	95	120	150	185	240
1	0,35	0,4	0,5	0,53	0,63	0,72	0,77	0,81	0,86	0,87	-
6	0,2	0,23	0,28	0,31	0,36	0,4	0,42	0,46	0,51	0,53	0,58
10	-	-	0,26	0,27	0,29	0,31	0,35	0,37	0,44	0,45	0,46

Некоторые данные заводов-изготовителей об асинхронных двигателях  
Справочник Асинхронные двигатели. М.1992.

Тип дви- гателя	Параметры					
	Напряжение, В	Мощность, кВт	Коэффициент мощности, о.е.	Пусковой ток, о.е.	Активное со- противление обмотки ста- тора, Ом	Реактивное сопротивление обмотки ста- тора, Ом
Завод «Электросила»						
ДА304-450Х-12У1	6000	200	0,75	5,5	2,69	17,0
ДА304-450У-10У1	6000	250	0,75	5,5	1,99	14,7
ДА304-450У-10У1	6000	315	0,8	6,0	1,575	10,4
ДА304-450У <sub>к</sub> -8У1	6000	400	0,81	6,0	0,987	8,1
ДА304-450У-8У1	6000	500	0,82	6,0	0,726	6,5
ДА304-450У-6У1	6000	630	0,85	6,5	0,586	4,76
ДА304-450У-4У1	6000	800	0,88	7,0	0,374	3,5
ЛОЭЗ НПО «Электрофизика»						
АЗО-200-375У1	6000	200	0,58	3,5	1,4	19,695
А4-450У-4У3	6000	1000	0,89	5,7	0,374	3,5
АО2-21-39-16У1	6000	2000	0,82	6,0	0,0808	0,9449
АО2-21-49-16У1	6000	3150	0,85	5,5	0,0566	0,6847
АО2-18-120-8/10У1	6000	4000/2000	0,81/0,69	6,3/6,6	0,0537/0,0911	0,0366/0,0633
АО2-20-83-12У1	6000	5000	0,87	6,5	0,0295	0,535
НПО ХЭМЗ						
АНЗ-4-15-45-10У3	6000	630	0,8	5,0	0,634	5,22
АНЗ-4-15-45-6У3	6000	1000	0,87	6,3	0,323	2,81
АНЗ-4-16-57-8У3	6000	1600	0,87	5,0	0,214	2,39